

УДК 548.526:669.017

А. А. Васильев¹, Н. А. Голубков^{1*}, Д. Ф. Соколов², С. Ф. Соколов²¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург² ПАО «Северсталь», г. Череповец

*golubkovna@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЯХ

Для высокопрочных конструкционных сталей проведено исследование кинетики мартенситного превращения при непрерывном охлаждении. Дополнительно выполнены измерения размера исходного зерна аустенита. На основе полученных результатов разработан вариант эмпирической модели для описания кинетики превращения в зависимости от химического состава стали и размера исходного зерна аустенита. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментом.

Ключевые слова: сталь, мартенситное превращение, кинетика, моделирование

A. A. Vasilyev, N. A. Golubkov, D. F. Sokolov, S. F. Sokolov

INVESTIGATION AND MODELING KINETICS OF MARTENSITIC TRANSFORMATION IN HIGH-STRENGTH STRUCTURAL STEELS

For high-strength structural steels kinetics of martensitic transformation under continuous cooling was studied. In addition, measurements of initial austenite grain size were carried out. Based on the obtained results a variant of empirical model was developed to describe kinetics of the transformation depending on chemical composition of steel and initial austenite grain size. Simulation results are in good agreement with experiment.

Key words: steel, martensitic transformation, kinetics, modeling

С помощью модуля Pocket Jaw экспериментального комплекса Gleeble 3800 исследована кинетика мартенситного превращения для 14–14 марок сталей, химические составы которых приведены в табл. Дополнительно проведены измерения размера исходного зерна аустенита.

Для количественного моделирования кинетики мартенситного превращения использовано известное выражение:

$$f_M(T) = f_\gamma(T = M_S)(1 - \exp(-k_M(M_S - T))),$$

где $f_\gamma(T = M_S)$ — доля аустенита в момент начала превращения; M_S — температура старта превращения, °C; T — температура, °C; k_M — эмпирический параметр модели. При определении зависимостей M_S и k_M от химического состава стали и размера зерна аустенита за основу приняты соответствующие эмпирические формулы, полученные в работе [1]. Уточненный набор значений эмпирических параметров в формулах для расчета M_S и k_M определен с использованием полученной базы данных по кинетике превращения и размерам исходного зерна аустенита. В результате получено:

$$M_S(^{\circ}\text{C}) = (554 - 394w_C - 36w_{\text{Mn}} - 15w_{\text{Si}} - 35w_{\text{Cr}} - 16w_{\text{Ni}} - 8,5w_{\text{Mo}})(1 - \exp(-d_\gamma^{0,5}))$$

$$k_M = 0.0255 - 0,008w_C - 0,001w_{\text{Mn}} - 0,002w_{\text{Cr}} - 0,00005w_{\text{Ni}} - 0,0001w_{\text{Mo}}$$

где $w_C, w_{\text{Mn}}, w_{\text{Si}}, w_{\text{Cr}}, w_{\text{Ni}}, w_{\text{Mo}}$ — содержания соответствующих легирующих элементов (масс. %).

Таблица

Химические составы исследованных сталей (масс. %) и размеры исходного зерна аустенита (d_γ)

Сталь	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	V	Ti	d_γ , мкм
07 С	0,74	0,55	0,36	0,04	0,04	—	0,07	—	—	—	70
65 Г	0,66	0,95	0,33	0,10	0,09	0,01	0,11	—	—	—	42
45Х	0,45	0,68	0,31	0,96	0,06	—	—	—	—	—	48
40 С2	0,40	0,68	1,58	0,08	0,07	—	0,2	—	—	—	74
J55	0,26	1,50	0,26	0,14	0,02	—	0,04	—	0,03	0,03	37
30 Г2	0,26	1,43	0,26	0,20	0,01	—	0,01	—	—	—	100

Окончание табл.

Сталь	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	V	Ti	d_{γ} , МКМ
K60	0,08	1,64	0,27	0,03	0,06	—	0,03	0,04	0,08	0,02	30
12Х1МФ	0,13	0,56	0,20	0,94	0,21	0,26	0,13	—	0,15	—	33
14ХГ2САФД	0,17	1,55	0,56	0,64	0,26	0,03	0,14	—	0,05	—	46
18ХГНМФБР	0,20	1,47	0,30	0,85	1,49	0,28	0,28	0,04	0,12	0,06	28
АБ2	0,08	0,37	0,25	0,41	1,94	0,25	0,52	—	0,03	—	34
АБК	0,07	0,87	0,15	0,50	3,38	0,28	0,50	0,01	0,09	—	135
S690	0,12	0,97	0,30	1,08	0,24	0,52	0,17	0,03	—	—	12
АБ3	0,04	0,35	0,25	0,63	3,50	0,43	1,10	—	0,05	—	21

На рис. 1, а показано, что результаты расчета температуры M_s с помощью полученной новой формулы хорошо согласуются с данными ее определения на основе экспериментальных кинетических кривых мартенситного превращения (рис. 1, б).

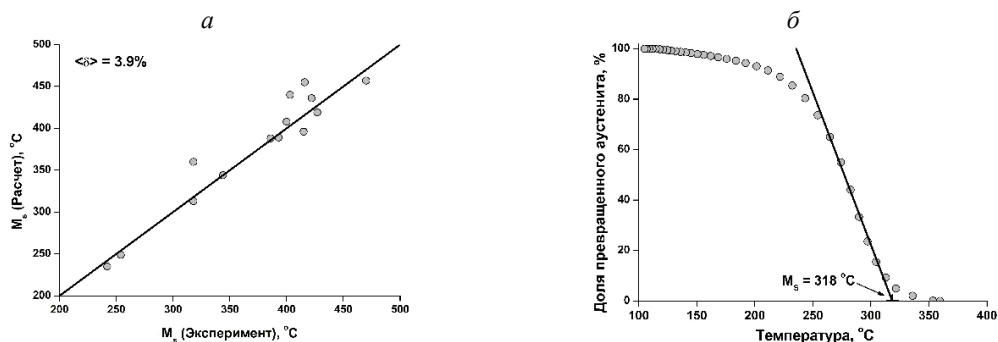


Рис. 1. Сравнение результатов расчета температуры старта мартенситного превращения M_s с ее экспериментальными значениями (а) и иллюстрация метода определения этих значений (б), где $\langle \delta \rangle$ — средняя абсолютная величина относительной погрешности расчетов

Результаты расчета кинетики превращения с помощью предложенной модели также хорошо согласуются с экспериментом (рис. 2).

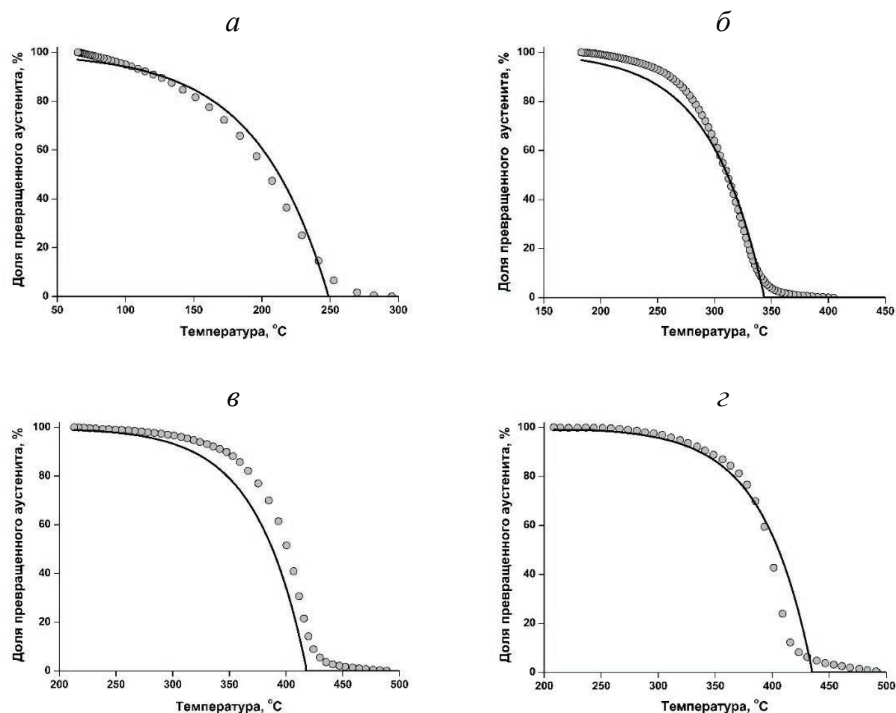


Рис. 2. Результаты расчета кинетики мартенситного превращения в сравнении с экспериментальными данными для некоторых сталей:

а — 65 Г; *б* — 40 С2; *в* — S690; *г* — АБЗ

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ по гранту (проект № 19-19-00281).

Литература

1. New metallurgical tools for optimum design of modern ultra-high strength low carbon martensitic steels (TOOLMART) / Technical report (RFSR-CT-2013–00013), 2019. 147p. DOI: 10.2777/674520.